

# ANÁLISIS COMPARATIVO EN EL DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO TIPO-1 T1FC CON EL CONTROLADOR PID COMO UNA APLICACIÓN DE UNA TRANSPOSICIÓN DIDÁCTICA ESPECIAL A TRAVÉS DE UNA MAQUETA VIRTUAL

**Comparative analysis in the design of the fuzzy controller type-1  
T1FC with the PID controller as an application of a special didactic  
transposition through a virtual mode**

**Bustillos Duran, Vidher Wilfredo**  
**vidher.bustillos@gmail.com**  
**Universidad Mayor de San Andrés**  
**La Paz, Bolivia**

## **Resumen**

Este artículo presenta el diseño de controladores difusos tipo-1 T1FC y PID utilizando el software de aplicación matemática MatLab v.15b, aplicado a una maqueta virtual para la transposición didáctica dentro del IIIE. En este artículo, los controladores son utilizados para el proceso de llenado de tanques de agua, tomando como base el modelo virtual para el control de tanques de agua que ofrece el software Control Station v.3.7®, presentando los valores y gráficas obtenidas al momento del funcionamiento de cada sistema con el controlador diseñado.

Se presentará especial énfasis en el diseño del controlador difuso tipo-1 denominado T1FC en base al universo de discurso seleccionado, la cantidad de funciones de membresía como la cantidad de reglas difusas que se utilizarán para la inferencia realizada según el método de Mamdani y que esta información sea de utilidad en posteriores investigaciones.

**Palabras Clave:** Controlador difuso, T1FC, universo de discurso, funciones de membresía, reglas difusas, inferencia de Mamdani.

## **Abstract**

This article presents the design of type-1 T1FC and PID fuzzy controllers using the mathematical application software MatLab v.15b, applied to a virtual model for didactic transposition within the IIIE. In this article, the controllers are used for the process of filling of water tanks, based on the virtual model for the control of water tanks offered by the Control Station v.3.7® software, presenting the values and graphs obtained at the time of operation of each system with the designed controller.

Special emphasis will be presented on the design of the type-1 fuzzy controller called T1FC based on the universe of discourse selected, the number of membership functions and the number of fuzzy rules that will be used for the inference carried out according to the Mamdani method and that this information useful in future research.

**Keywords:** Fuzzy controller, T1FC, universe of discourse, membership functions, fuzzy rules, Mamdani inference

## 1. Introducción

La aplicación de controladores, en sistemas automáticos, es una práctica que lleva muchos años, el estudio de mejores controladores para estos sistemas genera muchas investigaciones mejorando el convencional controlador PID, sin embargo con el avance de la tecnología al obtener procesadores cada vez más rápidos y mayores capacidades de almacenamiento, surge dentro el campo de la inteligencia artificial, los controladores difusos tipo-1 T1FC, como una alternativa eficaz de controlador, para ser utilizados dentro de los sistemas de control que necesiten una respuesta muy estable y que permita mediante programación, realizar cambios en base al comportamiento usual que presente un sistema o máquina. El desarrollo de controladores difusos tipo-1 T1FC, depende de la experticia del programador y de las distintas pruebas y aplicaciones en sistemas reales, esta investigación pretende mostrar las pruebas realizadas en un sistema de control de nivel de agua, presentando los resultados obtenidos al compararlo con un PID convencional.

## 2. Desarrollo de la investigación

### A. Base Teórica

Según lo establecido por Acosta [1] la lógica difusa emula la habilidad de razonamiento y hace uso de datos aproximados, pudiendo relacionar las entradas como las salidas dentro de un proceso computacional para determinar una solución con un alto grado de precisión.

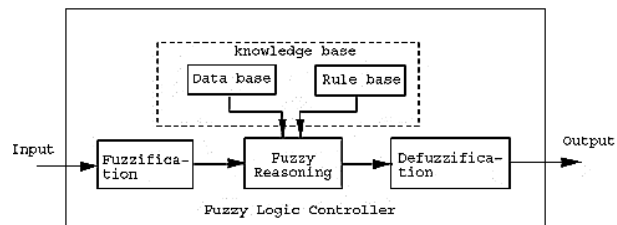
La lógica difusa utiliza de manera general tres etapas, las cuales son la **fusificación**, que es un proceso de conversión de los datos de entrada para su aplicación en conjuntos lógicos clásicos utilizando las funciones de pertenencia; la evaluación de reglas propias del

sistema también conocidas como **inferencia difusa** realiza las operaciones matemáticas propias para obtener respuestas numéricas difusas a partir de reglas lingüísticas aplicadas a los valores difusos de entrada y por último la **defusificación** es un proceso de la obtención de un valor cuantificable representativo de la salida partiendo de la información difusa que produce las reglas del sistema.

Un sistema difuso FLS<sup>1</sup> es un mapeo no lineal de datos de entrada en una salida escalar. Un sistema de control difuso mapea entradas de conjuntos crisp<sup>2</sup> en salidas de conjunto crisp, contiene cuatro componentes importantes estas son: las reglas difusas, la fusificación, el motor de inferencia y el defusificador [1].

La representación gráfica de un sistema de control difuso en general se presenta en la figura 1, en donde se puede apreciar las cuatro componentes más importantes:

**Figura 1. Esquema del sistema de control difuso**



Fuente: En base a lo establecido por De los Ríos [2]

i) *Las Reglas difusas*: Los sistemas de control difuso usan reglas difusas bien establecidas para combinar a uno o más conjuntos difusos de entrada a los cuales se los denomina antecedentes asociándolo un conjunto difuso de salida al que se lo denomina consecuente mediante una inferencia difusa a este conjunto de reglas que se

1 FLS = Fuzzy Logic System, Sistema basado en lógica difusa

2 Conjunto crisp = Conjuntos clásicos de la lógica formal, que solo permite dos opciones: de pertenencia o no pertenencia.

determinarás se las conoce como reglas difusas del tipo implicación SI – ENTONCES.

**If** <antecedente> **Then** <consecuente> (1)

ii) *La fuzificación:* En base a lo expuesto por Pantoja Laces [3], La fuzificación es un proceso mediante el cual se transforma un valor numérico concreto de una variable de entrada en un conjunto difuso que representa dicho valor, proceso por el cual se determina el grado de pertenencia mediante la función de membresía, con respecto a cada uno de los conjuntos difusos de entrada, los cuales deben pertenecer al universo de discurso.

iii) *El motor de inferencia:* En principio se establece que dentro de la lógica difusa, una proposición es una declaración que puede ser parcialmente verdadera o falsa e incluso puede llegar a ser una declaración total, dependiendo de la regla difusa y el tipo de implicación que generalmente se utiliza, con esa base teórica se puede indicar que el motor de inferencia es aquel que determina la salida más adecuada del sistema a partir de la evaluación de las implicaciones que puedan existir, tomando en cuenta los datos de entrada y la base de conocimiento.

iv) *El defusificador:* Es un proceso matemático que se utiliza para convertir un conjunto difuso en un número real. Este proceso permite asociar la entrada de los conjuntos difusos para obtener un valor numérico real representativo que es la conclusión de la inferencia difusa. Es por eso que existen diferentes métodos de defusificación, los cuales presentan resultados distintos, el que más se llega a utilizar es el método del Centroide según [6].

### 3. Método del Centroide

Asocia el centro del área de una figura irregular formada por el conjunto de números difusos, asociadas por la regla difusa, matemáticamente se expresa como:

$$C = \frac{\int_S x \mu(x) dx}{\int_S \mu(x) dx} \quad (2)$$

Donde:

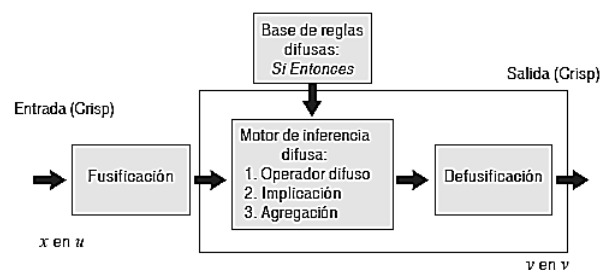
$\mu(x)$  = Es la función de pertenencia del conjunto de salida cuya variable es “x”

S = Es el dominio o rango de integración.

**Método de inferencia de Mamdani:** El método de inferencia de Mamdani es el más estudiado y utilizado en la dentro de las impliaciones difusas, nace por medio de la investigación y publicación del artículo titulado “Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant” desarrollado por Mamdani y Assilian, en este artículo se describe un esquema en el que un algoritmo difuso es aplicado al control de una máquina de vapor de laboratorio [4], en donde se utiliza la operación de intersección para obtener el mínimo de los conjuntos difusos asociados a una variable lingüística “x”, este método se puede utilizar en aplicaciones de ingeniería por su aplicación en sistemas computacionales con características accesibles en nuestro medio. El método de Mamdani se basa principalmente en el artículo sobre algoritmos difusos para sistemas complejos y toma de decisiones publicado por Zadeh [5].

La configuración básica de un sistema del tipo Mamdani donde se pueden distinguir los tres elementos principales como la Fusificación, el motor de inferencia y la defusificación en la figura 2.

**Figura 2. Método de inferencia de Mamdani**

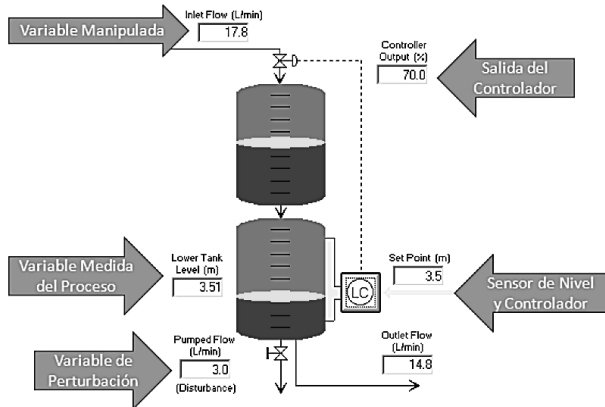


**Fuente:** En base a lo establecido por [13]

### B. Antecedentes

La maqueta virtual consta de cinco partes importantes, como se puede observar en la figura 3.

**Figura 3: Partes importantes del sistema**



**Fuente:** Según lo establecido por [7]

Para el modelado matemático del sistema de llenado de tanques de agua conectados, se debe tomar en cuenta algunas condiciones iniciales, las cuales permitan identificar su comportamiento dinámico en base a condiciones establecidas de funcionamiento normal, para su posterior generalización y comprobación de acuerdo a casos de estudio. Se tomará las siguientes condiciones iniciales:

- Las propiedades del fluido son constantes no cambian durante el proceso
- Dentro el tanque no habrá ningún tipo de reacción química

En base a LaPlata [8] el balance de la materia viene dado por:

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_1 - \dot{m}_2 \quad (3)$$

Donde:

$$m = \rho * V \quad \text{y} \quad \dot{m} = \rho * F$$

El significado de las variables es:

- $m$  = masa del líquido
- $\rho$  = densidad del líquido
- $V$  = Volumen del líquido =  $\pi * r^2$
- $Q$  = Flujo volumétrico – Caudal de líquido

Reemplazando en la ecuación 3, se tiene:

$$\frac{\rho * d(V)}{dt} = \rho * (Q_1 - Q_2)$$

$$\frac{d(V)}{dt} = (Q_1 - Q_2) \quad (4)$$

Como el tanque es un cilindro el volumen del líquido es:

$$V = A * h$$

Donde:

- $A$  = Área que ocupa el líquido =  $\pi * r^2$
- $r$  = radio circular del tanque =  $\frac{D}{2}$
- $D$  = Diámetro circular del tanque
- $h$  = Altura en que se encuentra el líquido

Reemplazando en la ecuación 4 se tiene:

$$\frac{d(A * h)}{dt} = (Q_1 - Q_2)$$

$$A * \frac{d(h)}{dt} = (Q_1 - Q_2) \quad (5)$$

De la ecuación 5, se puede observar que se tiene el flujo volumétrico será afectado por la altura del líquido en estado estable  $h$  y el coeficiente que presenta el orificio de salida  $K$ .

Para un flujo laminar:

$$Q = K * h \quad (6)$$

Para un flujo turbulento:

$$Q = K * \sqrt{h} \quad (7)$$

En base a Ogata [9] la resistencia R que presenta las tuberías al flujo volumétrico viene representado por:

$$R = \frac{\Delta \text{ en la altura del líquido}}{\Delta \text{ del flujo volumétrico ó Caudal}} \quad (8)$$

$$R = \frac{\Delta(h)}{\Delta(Q)} \quad (9)$$

Para un flujo laminar:

$$R_l = \frac{h}{Q} \quad (10)$$

Para un flujo turbulento la resistencia se representará como:

$$R_t = \frac{d(h)}{d(Q)} \quad (11)$$

Derivando la ecuación 7, se tiene:

$$d(Q) = \frac{K}{2*\sqrt{h}} d(h) \quad (12)$$

Ordenando:

$$\frac{d(h)}{d(Q)} = \frac{2*\sqrt{h}}{K} \quad (13)$$

De la ecuación 7 despejamos K y reemplazamos en la ecuación 13 ordenando:

$$\frac{d(h)}{d(Q)} = \frac{2*\sqrt{h}}{\frac{Q}{\sqrt{h}}} = \frac{2*\sqrt{h}*\sqrt{h}}{Q} = \frac{2*h}{Q} \quad (14)$$

Ahora, la derivada de la altura sobre la derivada del flujo volumétrico o Caudal es igual a la Resistencia

$$R_t = \frac{2*h}{Q} \quad (15)$$

Un concepto que ayuda a comprender de mejor manera el modelo matemático del sistema analizado es la capacitancia que es distinto a la capacidad. La capacitancia C de un tanque cilíndrico como el que se está analizando, se define como el cambio necesario en la cantidad del líquido almacenado, para producir un cambio en una unidad en la altura [9].

$$C = \frac{\Delta \text{ líquido almacenado}}{\Delta \text{ en la altura}} = \frac{(V_i - V_f)}{d(h)} \quad (16)$$

La capacitancia para el líquido laminar:

$$C = \frac{V}{h} \quad (17)$$

La capacidad en general respecto al tiempo:

$$C * d(h) = (Q_1 - Q_2) * d(t) \quad (18)$$

El flujo volumétrico de salida para un flujo laminar, tomando en cuenta la resistencia que presentará la tubería viene identificado por la ecuación 10, de donde:

$$Q_2(t) = \frac{h}{R_l} \quad (19)$$

Reemplazando esta última relación en la ecuación 18, se tiene:

$$C * d(h) = \left( Q_1(t) - \frac{h}{R_l} \right) * d(t)$$

$$C * d(h) = \left( \frac{Q_1(t) * R_l - h}{R_l} \right) * d(t)$$

$$R_l * C * \frac{d(h)}{d(t)} + h = Q(t) * R_l \quad (20)$$

El modelado de sistemas reales en el llenado de tanques con líquidos, presenta variaciones en la masa de entrada por distintos factores externos al sistema, los cuales causan ciertos retardos al momento de analizar su comportamiento. Es en ese sentido que para este tipo de sistemas con el modelamiento matemático encontrado es que se prevé un tiempo de reacción, al cual se lo denomina tiempo muerto, aplicando este concepto a la ecuación 20 se tendrá:

$$R_l * C * \frac{d(h)}{d(t)} + h = R_l * Q(t - t_m) \quad (21)$$

La doble normalización ganancia y tiempo de los procesos de primer orden con tiempo muerto First Order Plus Dead Time, FOPDT permite el análisis sistemático de la respuesta dinámica de los sistemas controlados [10], tomando en

cuenta la ecuación diferencial 21, se ajustará a los términos adecuados de representación de sistemas de primer orden. Según [11].

$$\begin{aligned}\tau_p &= R_l * C \\ K_p &= R_l \\ \theta_p &= t_m \\ u(t) &= Q(t) \\ y(t) &= h\end{aligned}$$

Obteniendo la ecuación diferencial siguiente:

$$\tau_p * \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_p * u(t - \theta_p) \quad (22)$$

Donde:

$\tau_p$  = Constante de tiempo del sistema  
 $K_p$  = Ganancia estática del sistema  
 $\theta_p$  = Tiempo e retardo de acción del sistema  
 $u(t)$  = Señal de control  
 $y(t)$  = Señal de medida de la variable de proceso

Aplicando la transformada de LaPlace a la ecuación diferencial 22, se tendrá:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p * e^{-\theta_p * s}}{\tau_p * s + 1} \quad (23)$$

Que es la representación matemática de un sistema de primer orden.

### C. Propuesta de desarrollo

De acuerdo a la metodología de Buchanan [12] para la construcción de un sistema experto, esta debe dividirse en cinco fases analizadas en el marco teórico, los cuales serán la base para el diseño del controlador difuso tipo-1, tomando en cuenta dentro de la formalización del prototipo, los aspectos propios que hacen una

correcta aplicación del método de Mamdani.

#### i) Identificación de datos normalizados

Los datos base del sistema de tanques de agua, se encuentran definidos de la siguiente manera:

- $q_i(t)$  [lt/min] = Caudal de líquido de entrada hacia el tanque.
- $q_o(t)$  [lt/min] = Caudal de líquido de salida del tanque.
- $q_d(t)$  [lt/min] = Caudal de líquido de la perturbación de entrada hacia el tanque.
- $h(t)$  [m] = Altura del nivel de líquido del tanque.
- $\Delta h(t)$  [m] = Desviación de la altura del nivel de líquido del tanque.
- Porcentaje [%] = Porcentaje de llenado tanque alimentador

#### ii) Conceptualización - variables in-out

Las variables identificadas para el desarrollo del controlador difuso tipo -1 son, como señales de entrada, la variable del error, producido entre la diferencia del valor del set-point con el valor de salida del sistema realimentado, y la variación de cambio instantáneo del error, definido por la derivada del error, estas dos variables definen el comportamiento transitorio y la estabilidad que presentará todo el sistema. Como señal de salida, el valor del nivel del tanque de agua principal, quien está relacionado con el caudal de líquido de entrada del tanque alimentador, caudal de salida del tanque principal, a la que se denomina variable de control. Los datos base del sistema de tanques de agua, se encuentran definidos de la siguiente manera:

**Tabla 1. Definición del universo de discurso de las variables de entrada y salida del controlador T1FC**

Variable	Etiqueta	Tipo	Universo de discurso	Unid.	Nº de FM
Referencia	Nivel deseado	Entrada	1 a 8	[m]	-
Señal de error	$e$	Entrada	-9 a 9	[m]	7
Señal del cambio instantáneo del error		Entrada	-1 a 1	-	7
Variable de control	Nivel	Salida	-10 a 10	[m]	7

**Fuente:** Elaboración propia

**iii) Formalización – Estrategia de Fuzzificación** distribuidas dentro de su universo de discurso, representadas en la tabla 2.

Para la variable de entrada del error, se definen siete variables lingüísticas del tipo triangular

**Tabla 2. Definición en términos lingüísticos de los conjuntos difusos del error**

Denomi	Identificación	Detalle
eNG	Error negativo grande	Es cuando la salida del error está muy por encima del valor de referencia.
eNM	Error negativo medio	Es cuando la salida del error está medianamente por encima del valor de referencia.
eNP	Error negativo pequeño	Es cuando la salida del error está por encima pero con muy poca diferencia del valor de referencia.
eZ	Error cero	Es cuando la salida del error es igual al valor de referencia.
ePP	Error positivo pequeño	Es cuando la salida del error está por debajo pero con muy poca diferencia del valor de referencia.
ePM	Error positivo medio	Es cuando la salida del error está medianamente por debajo del valor de referencia.
ePG	Error positivo grande	Es cuando la salida del error está muy por debajo del valor de referencia.

**Fuente:** Elaboración propia

Para la variable de entrada de la señal de cambio del error o derivada del error se definen siete variables lingüísticas distribuidas dentro de su universo de discurso, representadas en la tabla 3.

**Tabla 3. Definición en términos lingüísticos de los conjuntos difusos de la derivada del error**

Denomi	Identificación	Detalle
e'NG	Derivada error negativo grande	Es cuando la salida tiene una pendiente positiva.
e'NM	Derivada error negativo medio	Es cuando la salida tiene una pendiente medianamente positiva.
e'NP	Derivada error negativo pequeño	Es cuando la salida tiene una pendiente positiva casi constante.
e'Z	Derivada error cero	Es cuando la salida permanece constante.
e'PP	Derivada error positivo pequeño	Es cuando la salida tiene una pendiente negativa casi constante.
e'PM	Derivada error positivo medio	Es cuando la salida tiene una pendiente medianamente negativa.
e'PG	Derivada error positivo grande	Es cuando la salida tiene una pendiente negativa.

**Fuente:** Elaboración propia

Para la variable de salida o variable de control, se definen siete variables lingüísticas distribuidas dentro de su universo de discurso, representadas en la tabla 4.

**Tabla 4. Definición en términos lingüísticos de los conjuntos difusos de la variable de control**

Denomi	Identificación	Detalle
uNG	Salida negativa grande	Es cuando se necesita bajar de manera inmediata el nivel del tanque de agua principal.
uNM	Salida negativa medio	Es cuando se necesita bajar de manera rápida el nivel del tanque de agua principal.
uNP	Salida negativa pequeño	Es cuando se necesita bajar de manera lenta el nivel del tanque de agua principal.
uZ	Salida cero	Es cuando la salida permanece constante.
uPP	Salida positiva pequeño	Es cuando se necesita subir de manera lenta el nivel del tanque de agua principal.
uPM	Salida positiva medio	Es cuando se necesita subir de manera rápida el nivel del tanque de agua principal.
uPG	Salida positiva grande	Es cuando se necesita subir de manera inmediata el nivel del tanque de agua principal.

**Fuente:** Elaboración propia

Con los niveles de pertenencia y el establecimiento de las reglas difusas, se genera la salida difusa del sistema, estas reglas difusas es la forma que tiene el controlador difuso de guardar el conocimiento lingüístico, tomando

en cuenta las variables de entrada al controlador difuso, se pueden establecer las combinaciones posibles que pueden presentarse en el proceso de control.



**Tabla 5. Definición de reglas de inferencia por combinaciones posibles**

e/e'	e'NG	e'NM	e'NP	e'Z	e'PP	e'PM	e'PG
eNG	uNG	uNG	uNG	uNG	uNM	uNP	uZ
eNM	uNG	uNG	uNG	uNM	uNP	uZ	uPP
eNP	uNG	uNG	uNM	uNP	uZ	uPP	uPM
eZ	uNG	uNM	uNP	uZ	uPP	uPM	uPG
ePP	uNM	uNP	uZ	uPP	uPM	uPG	uPG
ePM	uNP	uFZ	uPP	uPM	uPG	uPG	uPG
ePP	uZ	uPP	uPM	uPG	uPG	uPG	uPG

Fuente: Elaboración propia

Utilizando el tipo de implicación general de Mamdani SI-ENTONCES de acuerdo a la ecuación 1, se tiene:

**Tabla 6. Conjunto de reglas difusas con implicación general de Mamdani**

REGLAS DIFUSAS
1. If (e is NG) and (e' is NG) then (u is NG)
2. If (e is NG) and (e' is NM) then (u is NG)
3. If (e is NG) and (e' is NP) then (u is NG)
4. If (e is NG) and (e' is Z) then (u is NG)
5. If (e is NG) and (e' is PP) then (u is NM)
6. If (e is NG) and (e' is PM) then (u is NP)
7. If (e is NG) and (e' is PG) then (u is Z)
8. If (e is NM) and (e' is NG) then (u is NG)
9. If (e is NM) and (e' is NM) then (u is NG)
10. If (e is NM) and (e' is NP) then (u is NG)
11. If (e is NM) and (e' is Z) then (u is NM)
12. If (e is NM) and (e' is PP) then (u is NP)
13. If (e is NM) and (e' is PM) then (u is Z)
14. If (e is NM) and (e' is PG) then (u is PP)
15. If (e is NP) and (e' is NG) then (u is NG)
16. If (e is NP) and (e' is NM) then (u is NG)
17. If (e is NP) and (e' is NP) then (u is NM)
18. If (e is NP) and (e' is Z) then (u is NP)
19. If (e is NP) and (e' is PP) then (u is Z)
20. If (e is NP) and (e' is PM) then (u is PP)
21. If (e is NP) and (e' is PG) then (u is PM)
22. If (e is Z) and (e' is NG) then (u is NG)
23. If (e is Z) and (e' is NM) then (u is NM)
24. If (e is Z) and (e' is NP) then (u is NP)

25. If (e is Z) and (e' is Z) then (u is Z)
26. If (e is Z) and (e' is PP) then (u is PP)
27. If (e is Z) and (e' is PM) then (u is PM)
28. If (e is Z) and (e' is PG) then (u is PG)
29. If (e is PP) and (e' is NG) then (u is NM)
30. If (e is PP) and (e' is NM) then (u is NP)
31. If (e is PP) and (e' is NP) then (u is Z)
32. If (e is PP) and (e' is Z) then (u is PP)
33. If (e is PP) and (e' is PP) then (u is PM)
34. If (e is PP) and (e' is PM) then (u is PG)
35. If (e is PP) and (e' is PG) then (u is PG)
36. If (e is PM) and (e' is NG) then (u is NP)
37. If (e is PM) and (e' is NM) then (u is Z)
38. If (e is PM) and (e' is NP) then (u is PP)
39. If (e is PM) and (e' is Z) then (u is PM)
40. If (e is PM) and (e' is PP) then (u is PG)
41. If (e is PM) and (e' is PM) then (u is PG)
42. If (e is PM) and (e' is PG) then (u is PG)
43. If (e is PG) and (e' is NG) then (u is Z)
44. If (e is PG) and (e' is NM) then (u is PP)
45. If (e is PG) and (e' is NP) then (u is PM)
46. If (e is PG) and (e' is Z) then (u is PG)
47. If (e is PG) and (e' is PP) then (u is PG)
48. If (e is PG) and (e' is PM) then (u is PG)
49. If (e is PG) and (e' is PG) then (u is PG)

Fuente: Elaboración propia

### iii) Formalización – etapa de defuzzificación

Para el diseño del controlador difuso, su utiliza el *método del centroide* expresado

matemáticamente en la ecuación 2, obteniendo el valor del centro del área de un polígono generado por la inferencia y el tipo de implicación que se utilizó para la creación de las reglas difusas, este método el más utilizado para la etapa de defuzzificación.

Haciendo la agregación de funciones triangulares y obteniendo el valor máximo de todas las reglas asociadas a los conjuntos difusos

$$\mu_{e \cup e'}(x, y) = \max\{\mu_e(x), \mu_{e'}(y)\} \quad (24)$$

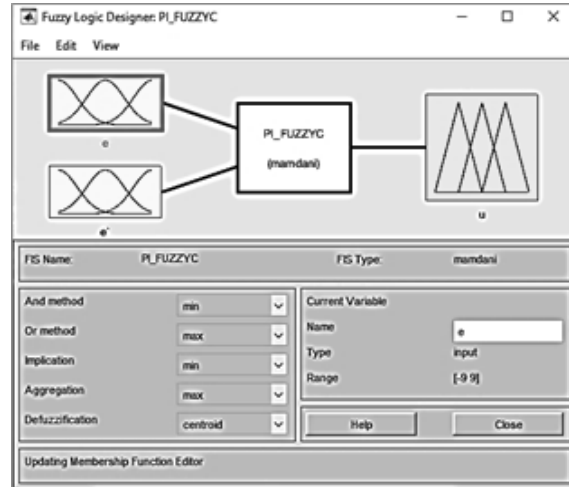
Una vez que se tiene todas las funciones triangulares, se procede al recorte para obtener la figura geométrica sólida de la salida con los valores máximos hallados en la agregación, con estos valores se procede a crear el vector de salida en base a las funciones de membresía de las entradas y las reglas de inferencia.

**iv) Implementación – Diagramas en bloques**

Para la fase de implementación del controlador difuso, de acuerdo a la metodología de Buchanan, utilizaremos el software de modelaje matemático MatLab 2015b y su herramienta Simulink, para el diseño del diagrama en bloques del controlador y simular el comportamiento de todo el sistema de control.

Dentro del software de modelamiento matemático MatLab 2015b, se tiene la aplicación Fuzzy Logic Designer, la cual se encuentra dentro el diseño y análisis de sistemas de control, el cual es necesario para implementar las funciones de membresía, los universos de discursos de las variables lingüísticas, las reglas difusas y la implicación general de Mamdani.

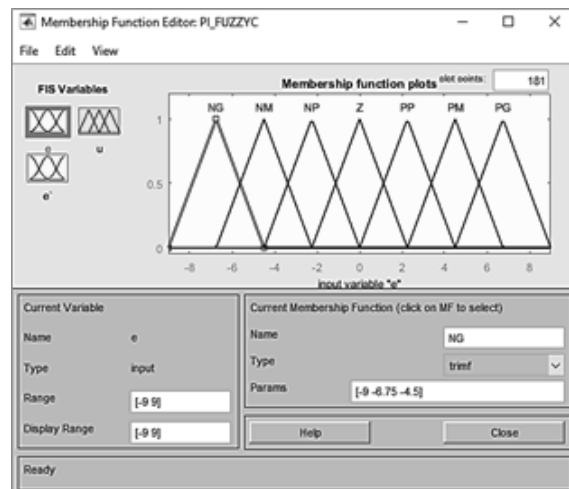
**Figura 4. Funciones de membresía representadas en Fuzzy Logic Designer de MatLab**



Fuente: Elaboración propia

El conjunto difuso y su universo de discurso de la función de membresía de la variable lingüística asignada al error, se presentan en la figura 5.

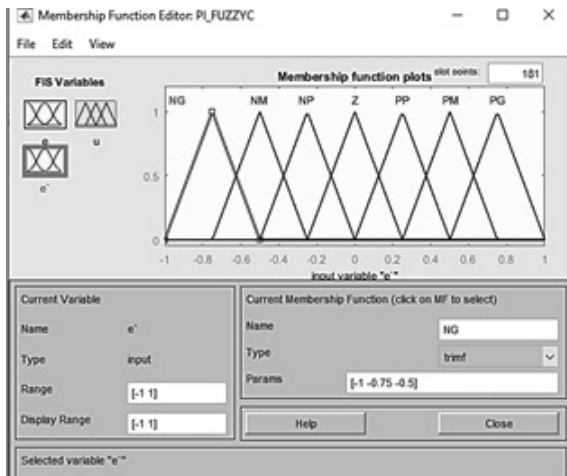
**Figura 5. Funciones de membresía de la variable de entrada del error**



Fuente: Elaboración propia

El conjunto difuso y su universo de discurso de la función de membresía de la variable lingüística asignada a la derivada del error, se presentan en la figura 6.

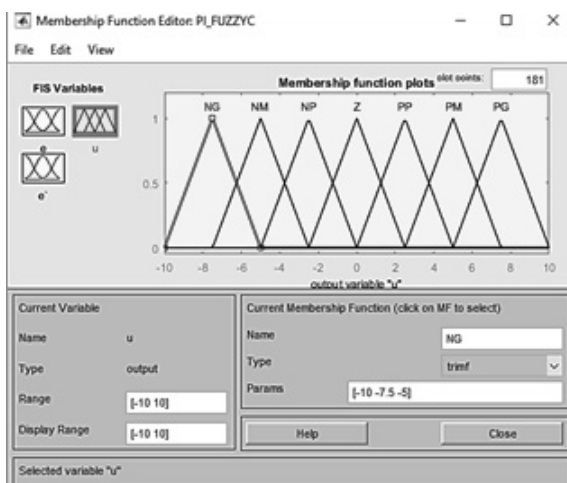
**Figura 6. Funciones de membresía de la variable de entrada de la derivada del error**



Fuente: Elaboración propia

El conjunto difuso y su universo de discurso de la función de membresía de la variable lingüística de salida asignada a la variable de control, se presentan en la figura 7.

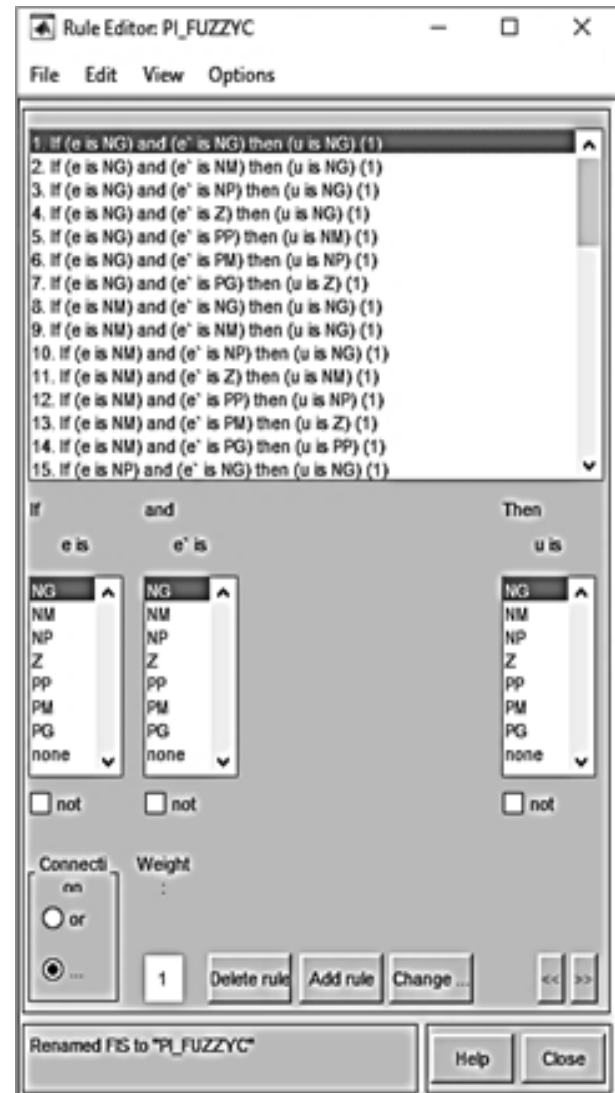
**Figura 7. Funciones de membresía de la variable de salida del nivel - variable de control**



Fuente: Elaboración propia

En el editor de las reglas difusas, introducimos el conjunto total de las reglas identificadas en la tabla 6, las cuales presentan la implicación general de Mamdani.

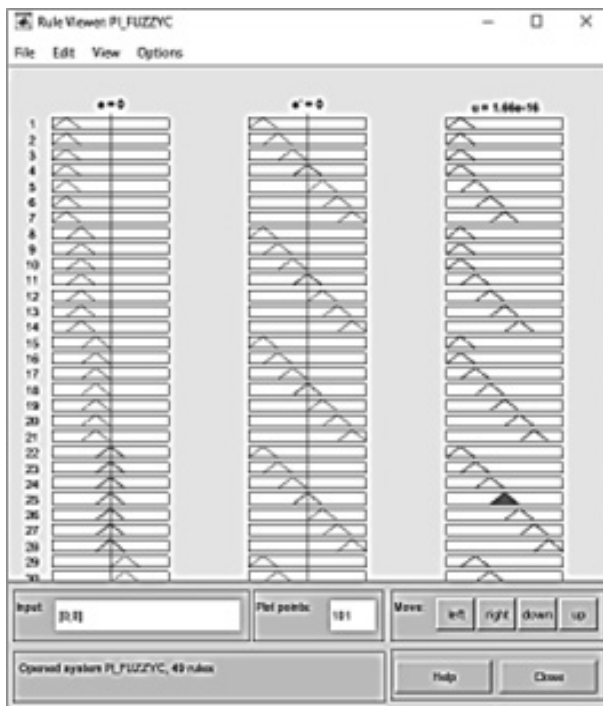
**Figura 8. Editor de las reglas difusas**



Fuente: Elaboración propia

La representación esquemática de las reglas difusas expresadas por las funciones triangulares, al momento de seleccionar un set-point de 4[m] en el tanque de agua principal se puede apreciar en la figura 9.

**Figura 9. Representación esquemática de las reglas difusas**

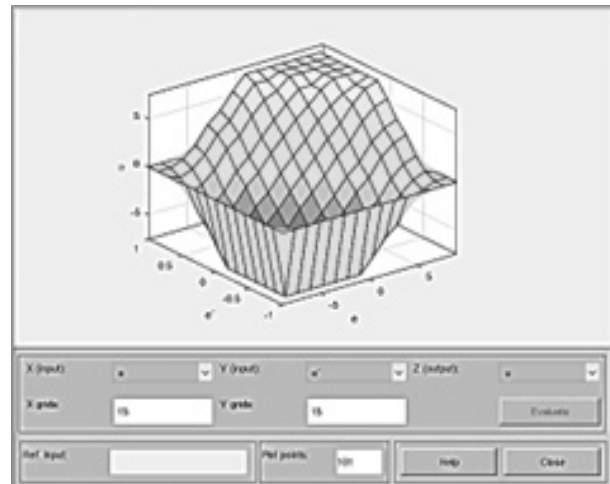


Fuente: Elaboración propia

La agrupación de las funciones de membresía tanto de las entradas como de la salida se genera mediante la inferencia de Mamdani, la cual muestra la superficie generada por cada uno

de los conjuntos difusos utilizados, mostrando la correlación existente entre los universos de discurso asignados a cada variable de todo el sistema.

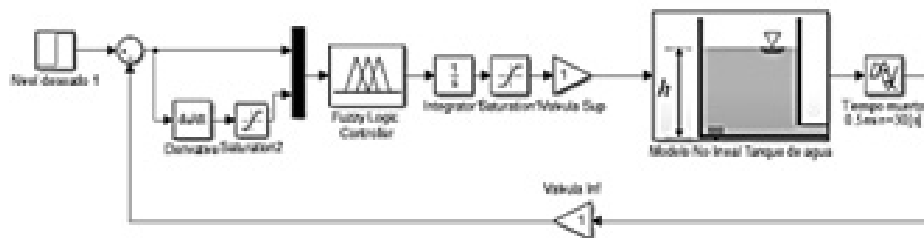
**Figura 10: Representación de la superficie generada por las variables lingüísticas del controlador**



Fuente: Elaboración propia

En la figura 11, se puede observar el diagrama de bloques completo referido al controlador difuso tipo-1 T1FC, propuesto según el diseño.

**Figura 11: Diagrama en bloques del controlador difuso tipo – 1 T1FC con el sistema de control**



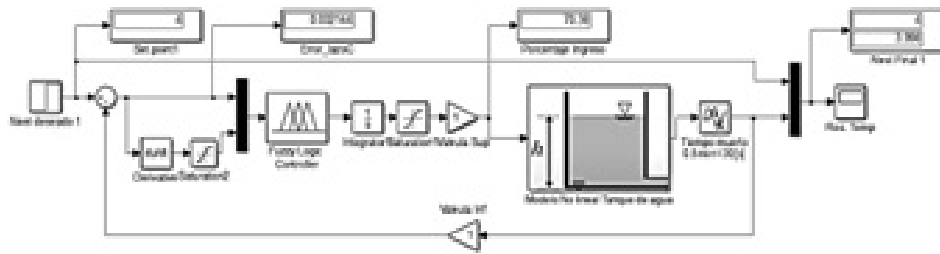
Fuente: Elaboración propia

**v) Prueba o Testeo – Diagramas en bloques**

Siguiendo la metodología de Buchanan, para el desarrollo de sistemas expertos, se procede a

realizar el testeo correspondiente al controlador difuso tipo-1 T1FC, mediante el funcionamiento completo del sistema y la asignación del mismo nivel de referencia

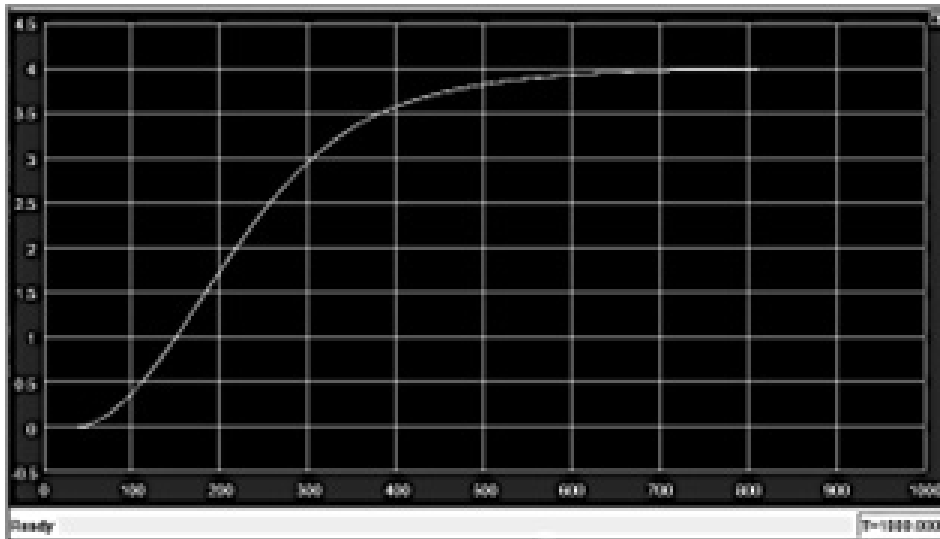
**Figura 12: Diagrama en bloques del sistema de control**



Fuente: Elaboración propia

El análisis de la prueba obtenida para un nivel deseado de 4[m], se puede apreciar en la figura 13, demostrando su funcionamiento de acuerdo al diseño propuesto.

**Figura 13: Respuesta temporal del sistema de control y el controlador difuso tipo-1**



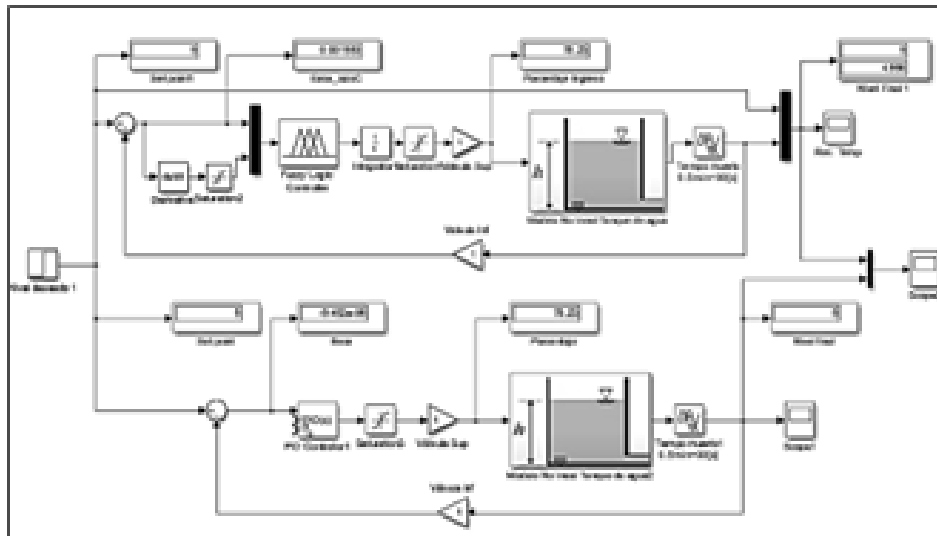
Fuente: Elaboración propia

#### D. Validación de resultados

Para el análisis de comportamiento, se tomarán en cuenta los distintos niveles a los cuales se quiere acceder mediante el set-point y se

mostrarán los valores obtenidos de su respuesta temporal de manera individual y colectiva, cuando la señal de entrada es una función escalón, en base al diagrama en bloques de la figura 14.

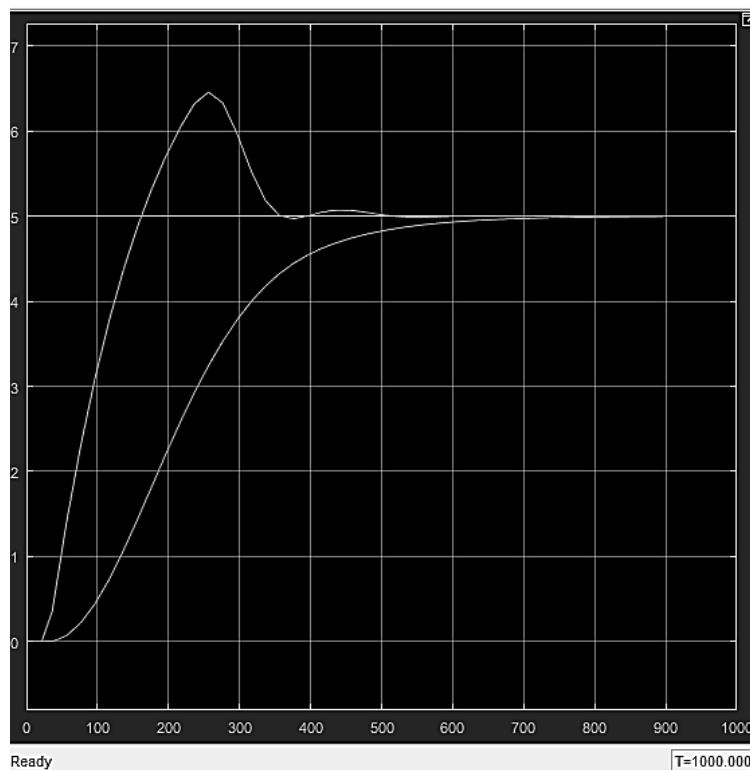
**Figura 14. Diagrama en Bloques del controlador difuso tipo-1 T1FC con el PID**



Fuente: Elaboración propia

La respuesta a 5[m]:

**Figura 15: Respuesta del sistema de control - modelo llenado de tanque de agua a 5[m]**



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la respuesta al escalón de 5[m] de los dos controladores, donde se analiza el régimen transitorio, se presenta en la tabla 7.

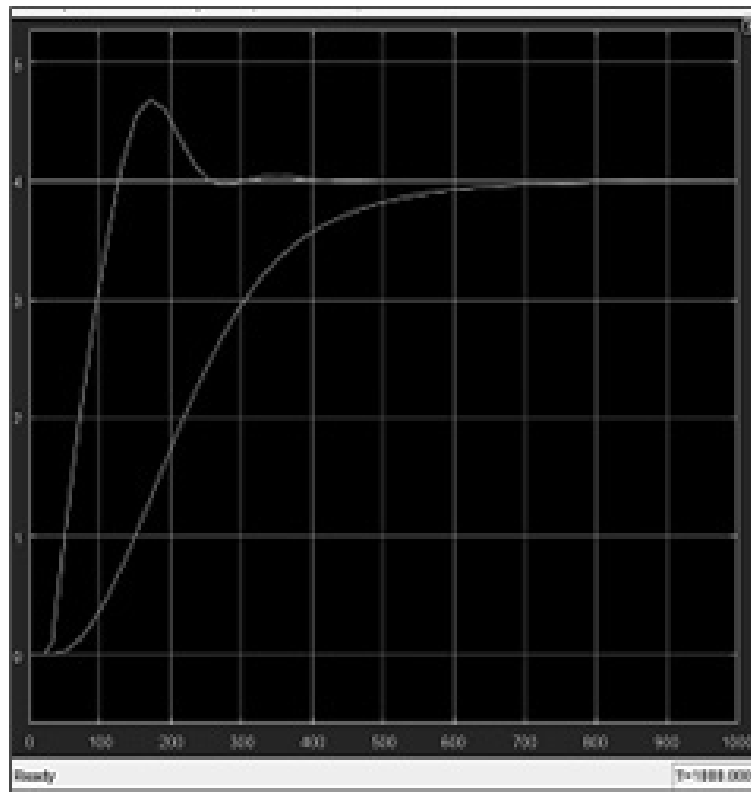
**Tabla 7. Sistema de control de nivel de tanques de agua a 5[m]**

Controlador	Tiempo de retardo – $t_d$ [s]	tiempo de subida – $t_r$ [s]	tiempo de pico – $t_p$ [s]	Sobreelongación - $M_p$ [m]	Tiempo de asentamiento – $t_s$ [s]
PID	81.623	160.914	256.063	1.457	599.072
T1FC	212.220	653.451	599.348	0	599.348

Fuente: Elaboración propia

La respuesta a 4[m]:

**Figura 16: Respuesta del sistema de control - modelo llenado de tanques de agua a 4[m]**



Fuente: Elaboración propia

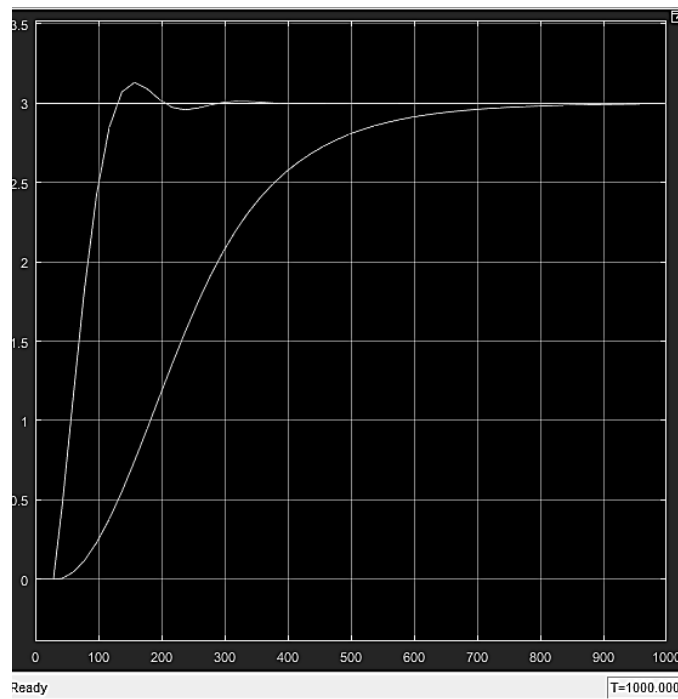
Los resultados de la respuesta al escalón de 4[m] de los dos controladores, donde se analiza el régimen transitorio, se presenta en la tabla 8.

**Tabla 8. Sistema de control de nivel de tanques de agua a 4[m]**

Controlador	Tiempo de retardo – $t_d$ [s]	tiempo de subida – $t_r$ [s]	tiempo de pico – $t_p$ [s]	Sobreelongación - $M_p$ [m]	Tiempo de asentamiento – $t_s$ [s]
PID	71.362	125.466	171.175	0.693	500.466
T1FC	217.817	653.451	733.665	0	733.675

Fuente: Elaboración propia

La respuesta a 3[m]:

**Figura 17: Respuesta del sistema de control - modelo llenado de tanques de agua a 3[m]**

Fuente: Elaboración propia

Los resultados de la respuesta al escalón de 3[m] de transitorio, se presenta en la tabla 9. los dos controladores, donde se analiza el régimen

**Tabla 9. Sistema de control de nivel de tanques de agua a 3[m]**

Controlador	Tiempo de retardo – $t_d$ [s]	tiempo de subida – $t_r$ [s]	tiempo de pico – $t_p$ [s]	Sobreelongación - $M_p$ [m]	Tiempo de asentamiento – $t_s$ [s]
PID	68.144	158.514	404.986	0.128	407.808
T1FC	231.891	653.451	701.317	0	701.317

Fuente: Elaboración propia



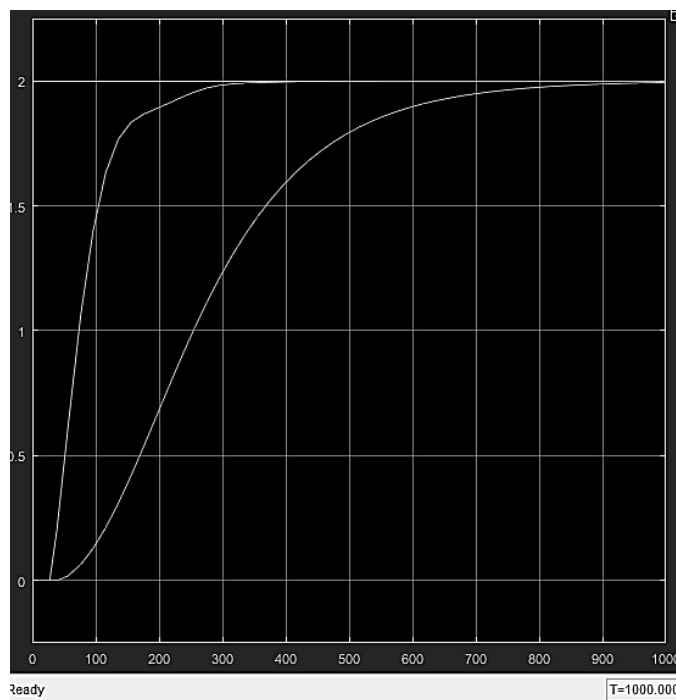
**La respuesta a 2[m]:** 2[m] de los dos controladores, donde se analiza  
 Los resultados de la respuesta al escalón de el régimen transitorio, se presenta en la tabla 10.

**Tabla 10. Sistema de control de nivel de tanques de agua a 2[m]**

Controlador	Tiempo de retardo – td [s]	tiempo de subida – tr [s]	tiempo de pico – tp [s]	Sobreelongación - Mp [m]	Tiempo de asentamiento – ts [s]
PID	73.848	360.771	366.416	0	498.119
T1FC	254.468	837.736	837.736	0	837.736

Fuente: Elaboración propia

**Figura 18. Respuesta del sistema de control - modelo llenado de tanques de agua a 2[m]**



Fuente: Elaboración propia

#### 4. Conclusiones

Las conclusiones a las cuales se pudo llegar al término de la presente investigación son:

- Se pudo presentar los principales conceptos de manera resumida relacionados con el diseño de controladores difusos tipo-1 T1FC, utilizando el software de modelado matemático MatLab v15b, para la transposición didáctica especial.
- Se realizó la simulación correspondiente del controlador difuso tipo-1 T1FC, para la

verificación del diseño, aplicado al sistema de control de nivel de agua, dentro del MatLab, tomando como base la maqueta virtual proporcionada por el software Control Station V3.7®

- Mediante el diseño y la utilización de Fuzzy Logic System de MatLab, se pudo establecer la cantidad de funciones de membresía como las reglas difusas dentro del universo de discurso establecido.
- En la validación de los resultados, se puede observar dentro el análisis en régimen transitorio, que el controlador PID, presenta en casi todos los casos un pico de sobreelongación, lo que llega a dañar los equipos conectados, sin embargo el controlador T1FC no presenta ninguna sobreelongación y es más estable en todos los casos, demostrando ser una solución para este tipo de sistemas, con lo cual esta investigación se convierte en una herramienta dentro del P.E.A. en el control de sistemas modelados.
- Para este caso se trabajó con siete funciones de membresía, tanto para el error como para la derivada del error, sin embargo este número puede variar en función a las características del diseño y experticia del desarrollador.
- Se presentan de manera práctica el método para el desarrollo de controladores tipo-1 T1FC, el cual pretende ser una guía para la transposición didáctica especial en el uso de las maquetas virtuales dentro de los procesos de llenado de tanques de agua.

## Bibliografía

- Acosta, H. “Diseño de controladores dedicados a la Lógica Difusa” - Tesis de doctorado. Madrid: Universidad Autónoma de Madrid, Escuela Politécnica Superior, 2006.
- De los Rios, C. D. “Evaluación de estructuras y métodos de ajuste de reguladores PID-DIFUSOS”, Piura: Universidad de Piura - Facultad de ingeniería, 2004.
- Pantoja Laces, W. A. “Análisis y comparación de sistemas de control PID Y PID-Difuso en lógica reconfigurable” Tehuantepec, Oaxaca: Universidad del ISTMO, 2013.
- Tremante, P., & Brea, E. “Una visión de la teoría difusa y los sistemas difusos enfocados al control difuso. Actualidad y nuevas tendencias”, p 126, 2014.
- Zadeh, Lofti. A. “ The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning. Information Sciences”, p 43-80, 1975.
- Diciembre Sanahuja, S. “Sistemas de Control con Lógica Difusa: Métodos de Mamdani y de Takagi-Sugeno-Kang (TSK)”. Valencia España: Universitat Jaume, 2017.
- Ochoa S. German y Ordoñez Jorge “Elaboracion de un manual para el control de nivel de líquido de un tanque mediante la utilización del software Control Station V3.7® e implementación en una maqueta”, Universidad del Azuay, Facultad de Ciencia y Tecnología, Ecuador, 2009.
- LaPlata, F. (18 de 02 de 2021). “Integración III”. Obtenido de: [http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/integracion3/UT2\\_Balance\\_de\\_materia.pdf](http://www.frlp.utn.edu.ar/materias/integracion3/UT2_Balance_de_materia.pdf).
- Ogata, K. “Ingeniería de control moderna”. Madrid España: PEARSON, 2010.
- Eduard, B. “Comparación entre diferentes procedimientos de ajuste de controladores PID. I. Valores máximos de la variable controlada y de la señal reguladora”, QS School of Engineering, Universitat Ramon Llull, 4, 2013.

Cooper, D. "Practical Process Control". Connecticut: University of Connecticut, 2004.

Delgado Linda, Cortez Augusto y Ibañez esteban, "Aplicación de la metodología de Buchanan para la construcción de un system expert con redes bayesianas", Revista de la Facultad

de Ingeniería Industrial, ISSN: 1810-9993, Universidad Nacional Mayor de San Marcos-Perú, 2015.

Espitia Cuchango, H. E., & Soriano Mendez, J. J. "Sistema de inferencia difusa basado en relaciones Booleanas". Facultad de Ingeniería - Universidad distrital Francisco José de Caldas, 52-67, 2010.

Fecha de recepción: 19 de septiembre del 2022

Fecha de aprobación: 9 de noviembre del 2022  
en reunión del Comité Editorial

